ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: HUTNICTWO z. 19 Nr kol. 607

Ryszard ŻUCHOWSKI

Politechnika Wrocławska

O BADANIACH ZMĘCZENIA CIEPLNEGO METALI

Streszczenie: W pracy omówiono metody badania zmęczenia cieplnego metali, a w szczególności metodę indukcyjną i oporową. Podano kryteria zniszczenia i oceniono odporność materiału na zmęczenie cieplne.

1. WSTĘP

Zmęczenie cieplne jest to proces powstawania i wzrostu uszkodzeń na skutek zmian energii wewnętrznej w materiale części maszyn pod wpływem wielokrotnych cyklicznych zmian temperatury. Pod nazwą zmęczenie cieplne należy rozumieć wszystkie procesy obciążenia, w których występują cykliczne zmiany temperatury.

Zasadniczą przyczyną powodują powstawanie uszkodzeń w materiałach sprężysto-plastycznych są odkształcenia plastyczne wywołane przez obciążenia zewnętrzne (czynne i bierne), gradienty temperatur oraz anizotropię krystaliczną lub strukturalną. Mechanizm zmęczenia cieplnego jest złożony. Złożoność ta polega na wzajemnych związkach i uwarunkowaniach zjawisk trudnych do obserwacji.

Badania zmęczenia cieplnego mają na celu:
- poznanie mechanizmu zniszczenia,
- ustalenie kryteriów zmęczenia,
- określenie trwałości,
- opracowanie metod obliczeń wytrzymałościowych.

Zarys problemów zmęczenia cieplnego zamieszczono w pracy [1].

Prace badawcze dotyczące zmęczenia cieplnego można podzielić na trzy grupy:
- badanie porównawcze, mające na celu porównanie zachowania się różnych materiałów,
- badania modelowe, mające dać odpowiedź na pytanie, jak długo będzie pracował w określonych warunkach dany element konstrukcji lub jakie czynniki wpływają na zwiększenie bądź zmniejszenie jego trwałości,
- badania podstawowe, mające na celu określenie wartości naprężeń lub odkształceń w funkcji parametrów procesu.

Badania zmęczenia cieplnego w warunkach laboratoryjnych nie są łatwe. Badania modelowe wymagają możliwie dokładnej symulacji kształtu danej części oraz parametrów i kształtu cyklu cieplnego, a w przypadku badań podstawowych należy umożliwić dokonywanie pomiarów naprężeń lub odkształceń oraz temperatury.

Symulacja rzeczywistych cykli cieplnych polega na nagrzewaniu próbek z możliwością wytrzymywania ich w określonej temperaturze i chłodzeniu. Próbki nagrzewa się:

- w piecach (nagrzewanie promieniowe),
- prądem elektrycznym z sieci (metoda oporowa),
- prądem o wielkiej częstotliwości (metoda indukcyjna),
- w strumieniu nagrzanego powietrza,
- za pomocą palnika gazowego,
- przez zanurzenie w stopionych metalach.

Czynnikami chłodzącymi mogą być:

- powietrze,
- woda,
- oleje,
- roztwory soli.

Chłodzenie osiąga się przez zanużenie w kąpieli lub za pomocą strumienia powietrza, Możliwe jest także chłodzenie naturalne (bez nawiewu).

Stosowane do badań próbki mają różne kształty: walcowe o przekroju kołowym, rurowe (cienkościenne), pryzmatyczne i płaskie.

W szczególnych przypadkach stosuje się próbki z otworami lub nacięciami (ocena roli koncentratów naprężeń, przyśpieszenie procesu powstawania pęknięć) oraz próbki o kształcie krążka.

Do pomiaru temperatury używane są termopary, pirometry lub termowizja.

2. METODY BADAŃ

Każdy ze sposobów symulowania cyklu cieplnego charakteryzuje się określonymi cechami (zaletami i wadami). Cechy te muszą być brane pod uwagę przy planowaniu badań.

W badaniach modelowych najbardziej zbliżone do rzeczywistych warunków nagrzewania płonącym gazem (łopatki turbin) czy też zanurzanie badanej części w stopionym metalu (kokile, wlewnice) wymaga stosowania złożonych układów sterujących parametrami cyklu cieplnego.

Duża bezwładność cieplna pieców ogranicza ich stosowanie do badań w warunkach izotermicznych oraz w warunkach procesów charakteryzujących się powolną zmianą temperatury.

Bardziej uniwersalne są sposoby nagrzewania za pomocą prądu elektrycznego (metoda indukcyjna i oporowa).

Wadą tych sposobów nagrzewania jest pewna odległość od rzeczywistych warunków pracy wielu elementów. Nagrzewanie za pomocą prądu elektrycznego jest nagrzewaniem bezpośrednim, natomiast w rzeczywistości części maszyn pracujących w warunkach cyklicznych zmian temperatury najczęściej są nagrzewane pośrednio, przez kontakt z nagrzanym medium (np. strumień spalin lub cieczy).

2.1. Metoda indukcyjna

Metoda ta nadaje się szczególnie do symulacji obciążeń cieplnych z gradientem temperatury. Może być ona stosowana również do nagrzewania elementów lub próbek cienkościennych.

Podstawowym urządzeniem jest w tym przypadku piec indukcyjny, zamieniający energię elektryczną o częstotliwości sieciowej w energię prądów szybkozmiennych, co umożliwia dużą koncentrację mocy w wierzchnich warstwach badanych części. Badana część jest umieszczona w cewce indukcyjnej (induktorze). Nagrzewanie materiałów przewodzących prąd jest wynikiem powstawania prądów wirowych w wierzchnich warstwach elementu umieszczonego w cewce indukcyjnej.

Prace [2-5] są poświęcone badaniu zachowania się żaroodpornych stopów pod wpływem nagrzewania indukcyjnego i promieniowego (w piecu). Wyniki tych i innych badań wykazały, że własności wytrzymałościowe uzyskane w warunkach nagrzewania indukcyjnego i promieniowego były podobne, co pozwoliło na uznanie obu metod za równoważne i zapewniające równorzędne możliwości symulacji cyklicznych obciążeń cieplnych w warunkach laboratoryjnych [6].

Główne zalety indukcyjnej metody nagrzewania są następujące:
- duża prędkość nagrzewania,
- nagrzewanie badanej próbki osiągane sposobem bezkontaktowym,
- prądy wirowe powstają tylko w cienkiej warstwie wierzchniej próbki, co umożliwia uzyskanie dużych gradientów temperatury.

Zasadnicze wady metody indukcyjnej to:
- brak możliwości określenia stanu odkształcenia i naprężenia w przypadku nagrzewania powierzchniowego,
- konieczność zabezpieczania termopar przed zakłóceniami (połączenie z układem rejestrującym przez kondensatory [6]).

Bardziej istotne znaczenie ma wybór częstotliwości stosowanych generatorów, gdyż zależą od niej straty energii. Niekorzystne są zarówno zbyt małe jak i zbyt wielkie częstotliwości.

Warto także zwrócić uwagę na zjawisko nierównomiernego nagrzewania wierzchniej warstwy części lub próbek wykonanych ze stali o małej zawartości domieszek, które znika dopiero wówczas, gdy temperatura całej powierzchni osiągnie 1200 K. Ta nierównomierność występuje częściej w przypadku stosowania wielozwojowych cewek indukcyjnych, a jej przyczyną jest

efekt magnetostrykcji [6]. W austenitycznych stalach żarowytrzymałych jako paramagnetycznych efekt ten nie występuje.

W przypadku badanych elementów w warunkach cyklicznych zmian temperatury wywoływanych za pomocą pieca indukcyjnego bardzo istotnym problemem jest równomierność nagrzewania na obwodzie i długości próbki. Wymaga to stosowania cewek indukcyjnych o bardzo dokładnym odwzorowaniu kształtu i wymiarów badanego elementu oraz dokładności w ich wzajemnym ustawieniu. W pracach [6, 7] zaleca się stosowanie w tym celu cewek wielozwojowych, a w przypadku próbek walcowych o przekroju kołowym obracanie próbek względem ich osi z prędkością nie mniejszą niż 10 obrotów na cykl.

Cykliczne zmiany temperatury można również uzyskać w warunkach stałej pracy pieca indukcyjnego za pomocą urządzenia wywołującego ruchy posuwisto-zwrotne próbki względem cewki indukcyjnej. Taki sposób wywoływania cyklicznych zmian temperatury może być stosowany tylko w przypadku próbek pryzmatycznych.

Indukcyjna metoda nagrzewania nadaje się szczególnie do badania części maszyn o złożonych kształtach, np. łopatek turbin, stosowana była również w badaniach stali narzędziowych [8, 9].

2.2. Metoda oporowa

Nagrzewanie próbki metodą oporową umożliwia ilościową ocenę stanu naprężenia i odkształcenia, ze względu na możliwość uzyskania jednorodnego, w przybliżeniu, pola temperatury przynajmniej w części objętości próbki, W metodzie tej wykorzystuje się zamianę energii elektrycznej na cieplną podczas przepływu prądu przez próbkę. Ilość ciepła wydzielonego w jednostce czasu zależy od natężenia prądu i oporu próbki.

Zasadniczym elementem układu grzejnego jest transformator, którego zadaniem jest transformowanie energii elektrycznej prądu przemiennego z napięcia pierwotnego na wtórne. Wskutek odpowiedniej przekładni transformatora można uzyskać prąd o dużym natężeniu. Układ grzejny w przypadku metody oporowej jest znacznie prostszy niż w przypadku indukcyjnej metody nagrzewania.

Ze względu na odprowadzenie ciepła do otoczenia pola temperatury w próbce jest niejednorodne. Temperatura zmienia się wzdłuż osi i średnicy próbki [10]. Im bliżej uchwytów, tym mniejsza amplituda zmian temperatury, a różnice te zależą od masy uchwytów.

Różnice temperatury na promieniu próbki w przypadku próbek cienkościennych lub o małej średnicy można pominąć. Potwierdzają to również autorzy pracy [11]. W pracy Tairy i Ohnamiego [12] podczas badania stali AISI318 w warunkach cyklicznych zmian temperatury w zakresie 873-973 K stwierdzono, że można pominąć wpływ różnicy temperatur w próbkach walcowych o średnicy 10 mm.

W przypadku próbek o większej średnicy gradient temperatury może być przyczyną zmniejszenia trwałości w wyniku powstania przestrzennego stanu naprężenia.

Na długości próbki nie można pominąć różnic temperatury. Powodują one niejednorodność odkształceń na długości próbki, które w temperaturze 1023 K w cienkościennej próbce stalowej zmieniały się od około 0,7 do 3% na długości 3 mm [13]. Zmniejszenie gradientu temperatury można osiągnąć stosując próbki o skokowo zmiennej średnicy. W pracy [11] podano, że wpływ różnicy temperatury nie przekraczającej 50 K na długości pomiarowej próbki można pominąć.

Istotne znaczenie ma wybór sposobu sterowania zmianami temperatury. Sterowanie tymi zmianami może być bezpośrednie przez sprzężenie układu sterującego z miernikiem temperatury (np. termopara) lub pośrednie, przez regulację czasu nagrzewania. Ten drugi sposób jest mniej dokładny ze względu na przybliżony sposób oceny podstawowego parametru, jakim jest temperatura. Bezpośrednie sterowanie zmianami temperatury za pomocą termopar jest stosowane najczęściej w badaniach podstawowych. Sposób ten umożliwia prowadzenie badań w warunkach programowanych zmian kształtu cyklu cieplnego.

Termoparę mocuje się do próbki za pomocą kitu odpornego na podwyższone temperatury, zgrzewania lub spawania. Spoinę mierniczą termopary można również umieścić w nacięciach wykonanych elektroiskrowo. Każdy z tych sposobów charakteryzuje się określonymi zaletami i wadami. Kit można stosować w niezbyt wysokich temperaturach, spawanie i zgrzewanie zmienia strukturę w warstwie wierzchniej, drążenie otworów jest zaś przyczyną koncentracji naprężeń i zmian struktury w pobliżu nacięcia, a ponadto powoduje miejscowe zwiększenie gęstości prądu, co może być przyczyną znacznych błędów w ocenie wartości temperatury próbki. W pracy [14, 15] termopary mocowano dociskając je do powierzchni próbki koralikiem ceramicznym i sprężystą taśmą kanthalową. Sposób ten nie może być stosowany, gdy średnica próbki istotnie zmniejsza się podczas badań.

3. KRYTERIA ZNISZCZENIA

Kompleks zagadnień zmęczenia cieplnego można sprowadzić do dwóch zadań wymagających rozwiązania:

a) opracowania metod oceny stanu naprężenia i nośności elementów konstrukcji w warunkach cyklicznych zmian temperatury,

b) ustalenia kryteriów zniszczenia uwzględniających warunki pracy takich urządzeń i możliwości współczesnych metod obliczeń.

Rozwiązanie tych zadań wymaga ustalenia zależności kinetyki procesu powstawania uszkodzeń od wartości naprężeń, rodzaju stanu naprężenia, sposobu obciążania i własności materiału.

Za miarę zniszczenia materiałów w stanie sprężysto-plastycznym przyjmuje się zwykle liczbę cykli, po której następuje istotna zmiana wymiarów lub kształtu albo złom, czy też pęknięcia części urządzenia, co uniemoż-

liwia dalsze jej użytkowanie. Każdy cykl może być scharakteryzowany i opisany za pomocą plastycznej składowej (lub całkowitej wartości) odkształcania lub też energii rozproszonej w jednostce objętości materiału podczas trwania cyklu, określonej polem pętli histerezy. Kryteria zniszczenia przyjmujące za miarę stopnia uszkodzenia materiału wartości odkształcenia określa się jako kryteria odkształceniowe, te zaś, według których wartość energii pochłoniętej przez jednostkę materiału podczas jednego cyklu jest miarą stopnia uszkodzenia, noszą nazwę kryteriów energetycznych. Jest to jednak podział umowny.

Feltner i Morrow [16] sformułowali hipotezę, według której miarą zniszczenia w procesie zmęczenia jest całkowita wartość energii nieodwracalnie pochłoniętej przez jednostkę objętości materiału. Według tej hipotezy zniszczenie nastąpi wtedy, gdy wartość tej energii osiągnie wartość równą wartości pracy potrzebnej do zniszczenia próbki w statycznej próbce rozciągania.

Hipoteza Feltnera i Morrowa została doświadczalnie potwierdzona przez Cardena [17], Marrowa i Tulera [18] oraz Gillemota [19].

Według hipotezy Martina [20] za miarę zniszczenia należy przyjąć tylko tę część energii pochłoniętej przez jednostkę objętości materiału, która jest związana z procesem umocnienia materiału.

Porównywanie wartości energii pochłoniętej przez jednostkę objętości materiału w procesie zmęczenia z wartością pracy potrzebnej do zniszczenia próbki w statycznej próbie rozciągania jest możliwe przy założeniu stałej pojemności energetycznej materiału.

Romanow w pracach [21, 22] przyjął również koncepcję stałej pojemności energetycznej materiału. Analizując wyniki badań kilku stopów stwierdził, że wartość energii związanej z procesem umocnienia, nagromadzonej w próbce w procesie zmęczenia, jest większa aniżeli wartość pracy potrzebnej do zniszczenia tej próbki w statycznej próbie rozciągania.

Romanow założył, że o zniszczeniu decyduje różnica energii w dwóch częściach cyklu - rozciągającej i ściskającej - z pominięciem energii związanej z umocnieniem materiału. Za przyczynę zniszczenia Romanow uważa cykliczny efekt Bauschingera.

Według Pisarenki, Możarowskiego i Antipowa [23] za miarę zniszczenia podlegających umocnieniu materiałów w warunkach cyklicznych zmian temperatury, powodujących uplastycznienie przeciwzwrotne, należy przyjąć wartość energii związanej z procesem umocnienia.

Analiza mechanizmu zniszczenia w procesie zmęczenia cieplnego wykazała, że proces ten można uważać za wynik sumowania dwóch procesów składowych zmęczenia mechanicznego, wywołanego zmiennym polem sił oraz pełzania. Ten pogląd stanowi podstawę kryteriów zniszczenia proponowanych przez autorów wielu prac.

Kryterium zniszczenia w warunkach cyklicznych zmian temperatury wywołujących znaczne odkształcenia plastyczne można zapisać w postaci [24]:

$$\frac{1}{N} = F\left(\frac{1}{N_o}\right) + \lambda). \tag{1}$$

gdzie:

$\frac{1}{N_o}$ - stopień uszkodzenia materiału w procesie zmęczenia w jednym cyklu,

N - liczba cykli do złomu,

$\lambda = \int_0^t \frac{dt}{t_p}$ - stopień uszkodzenia spowodowany przez pełzanie w czasie Δt (czas trwania jednego cyklu),

t_p - czas potrzebny do zniszczenia w warunkach pełzania (w stałej temperaturze przy stałym obciążeniu).

Najczęściej przyjmowana jest hipoteza liniowego sumowania uszkodzeń "D_c", powstałych na skutek cyklicznych zmian temperatury oraz wyniku pełzania "D_p"

$$D_c + D_p = 1. \tag{2}$$

W pracy [24] zaproponowano następującą postać kryterium zniszczenia:

$$\left(\frac{N}{N_o}\right)^{\alpha} + (N\lambda)^{\beta} = 1. \tag{3}$$

gdzie α i β - stałe, a pozostałe oznaczenia jak w zależności (1).

W pracach [24 - 26] stwierdzono na podstawie doświadczeń, że można przyjąć hipotezę liniowego sumowania uszkodzeń ($\alpha=\beta=1$), natomiast autorzy prac [27, 28] uważają, że nie znajduje ona wystarczającego potwierdzenia doświadczalnego.

Fiłatow i Sznejdrowicz [27] stwierdzają, że w ogólności nie można przyjmować hipotezy liniowego sumowania uszkodzeń; przyjęcie tej hipotezy jest uzasadnione natomiast w przypadku szybkich zmian temperatury bez przetrzymywania w maksymalnej temperaturze cyklu. Autorzy pracy [27] proponują nieliniowe sumowanie uszkodzeń.

4. OCENA ODPORNOŚCI MATERIAŁU NA ZMĘCZENIE CIEPLNE

Konstruktora maszyn i urządzeń pracujących w warunkach cyklicznych zmian temperatury interesuje odporność materiału na zmęczenie cieplne, czyli zdolność do przenoszenia (wytrzymania) określonej liczby cykli cieplnych bez zniszczenia. Odporność tę określa się jako trwałość, a za jej miarę przyjmuje się liczbę cykli do zniszczenia danego elementu. Inną miarą trwałości może być czas potrzebny do zniszczenia tego elementu.

Jednym z prostszych sposobów oceny trwałości w warunkach zmęczenia cieplnego (gdy wpływ pełzania jest stosunkowo mały) jest ocena na podstawie zależności ustalonych dla zmęczenia izotermicznego. Trwałość określa się w takim przypadku z zależności Mansona-Coffina

$$N_{kr}^{k} \Delta \varepsilon_{pl} = C. \tag{4}$$

w której:

N_{kr} - liczba cykli do złomu,
k i C - stałe materiałowe,
$\Delta\varepsilon_{pl}$ - plastyczna składowa odkształcenia elementu w czasie cyklu.

Ocena trwałości elementu w warunkach cyklicznych zmian temperatury na podstawie odkształceniowego kryterium zniszczenia, np. według zależności (3), wymaga znajomości stopnia uszkodzenia materiału w obu procesach składowych (zmęczenie, pełzanie). Trudności tych próbowano uniknąć, wprowadzając pojęcia równoważnego czasu zastępczego lub równoważnej temperatury zastępczej [12].

Badania przeprowadzone przez autora i współpracowników [14], [29] pozwoliły znaleźć zależność między zmianami wartości własności wytrzymałościowych i wartości pracy potrzebnej do zniszczenia próbki podczas powolnego rozciągania w temperaturze otoczenia a wartością odkształcenia nagromadzonego w procesie zmęczenia cieplnego. Przyjmując koncepcję stałej pojemności energetycznej a także równoważności uszkodzeń powstałych w warunkach cyklicznych zmian temperatury oraz stałego obciążenia polem sił i w warunkach działania cyklicznie zmiennych obciążeń w stałej temperaturze ustalono zależność między pracą potrzebną do zniszczenia próbki podczas powolnego rozciągania w temperaturze otoczenia a szerokością zastępczą δl_z pętli histerezy w układzie temperatura-odkształcenie [30].

Zależność tę można przedstawić w postaci:

$$\Delta W = \beta \sum_{N} \delta l_z \tag{5}$$

gdzie:

β - stała wyznaczana doświadczalnie.

W przypadku, gdy szerokość pętli histerezy nie zmienia się w przeważającym zakresie żywotności próbki, jej trwałość można określić w sposób przybliżony z zależności:

$$N_{kr} = \frac{\Delta W_{kr}}{\beta \cdot \delta l_z}. \tag{6}$$

w której:

N_{kr} - liczba cykli zniszczenia,

ΔW_{kr} - wartość pracy potrzebna do zerwania próbki w statycznej próbie rozciągania (w temperaturze otoczenia), odpowiadająca wyczerpaniu nośności próbki (stan przedkrytyczny).

Zależność (6) stanie się równoważna zależności (4), jeśli w tej ostatniej przyjąć $C = \Delta W_{kr}/\beta$, $k = 1$ oraz $\Delta \varepsilon_{pl} = \delta l_z$.

Przeprowadzone ostatnio badania stali 50H17G17 [31] wykazały, że wartość pracy potrzebnej do zniszczenia próbki podczas jej powolnego rozciągania w temperaturze otoczenia jest wprost proporcjonalna do wartości odkształcenia (mierzonego w minimalnej temperaturze cyklu) nagromadzonego w procesie zmęczenia cieplnego, w przebadanym zakresie zmian naprężenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań [31] można stwierdzić, że wartość odkształcenia nagromadzonego w próbce obciążonej stałą siłą w warunkach cyklicznych zmian temperatury jest stała (rys. 1). Można ją przyjąć za miarę stopnia uszkodzenia materiału.

Badania te pozwoliły również na określenie zależności między liczbą cykli do złomu N_{kr} a prędkością odkształcenia $\dot{\varepsilon}_{Tmin}$ w zakresie jej stałej wartości. Zależność tę można przedstawić równaniem: (rys. 2)

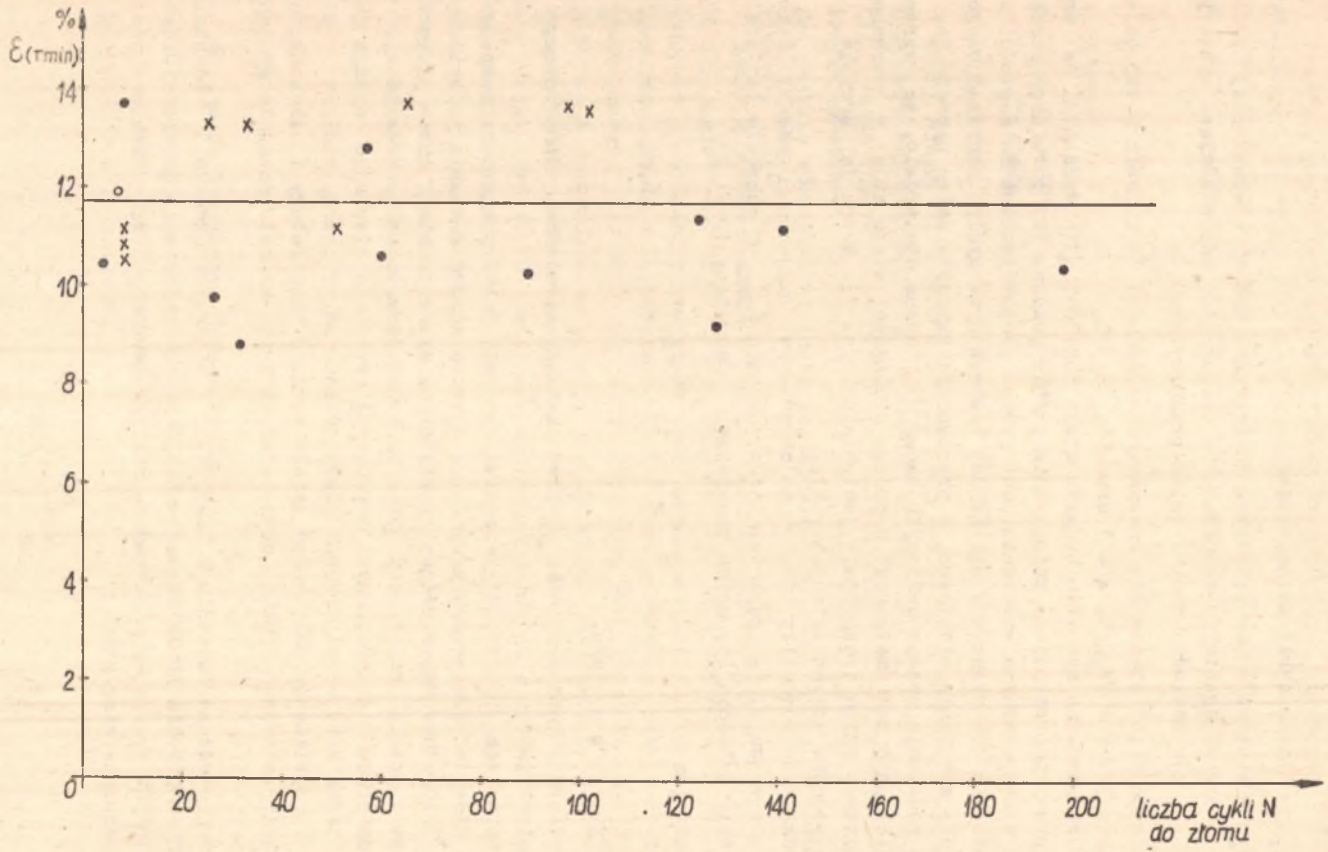
$$N_{kr} = A \cdot 10^{-b\dot{\varepsilon}_{Tmin}}, \tag{7}$$

w którym A, b - stała.

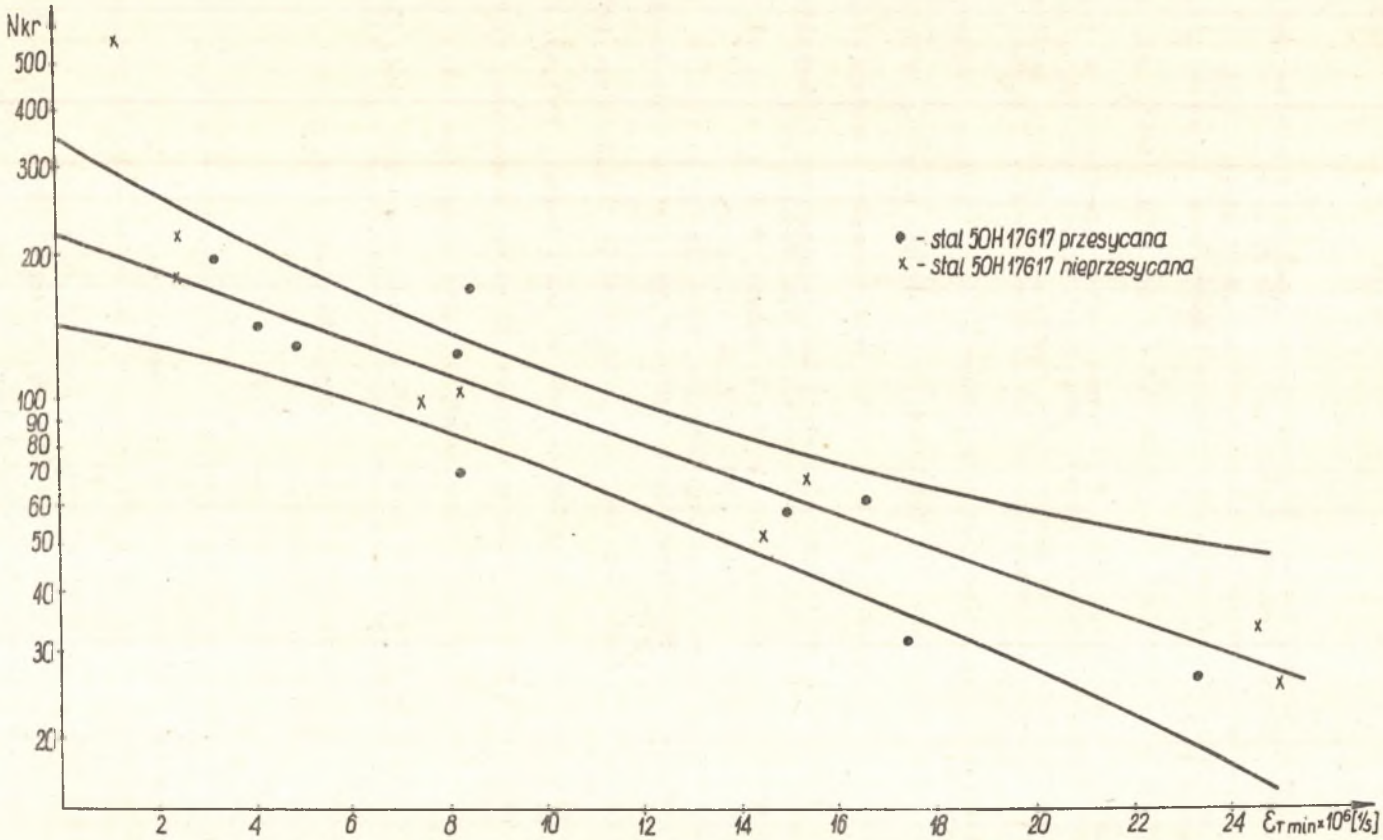
Prędkość odkształcania $\dot{\varepsilon}_{Tmin}$ jest funkcją naprężenia, temperatury i stanu materiału.

W badaniach [10, 14, 31] stosowano próbki, w których zmiany temperatury na długości pomiarowej były duże, a zatem i odkształcenia próbki nie były jednorodne. Szerokość pętli histerezy wyznacza się w takim przypadku również w sposób przybliżony [32]. Dokładniejsza ocena zachowania się różnych materiałów żaroodpornych w procesie zmęczenia cieplnego wymaga dalszych badań kinematyki procesu odkształcania na próbkach, których stan jest w przybliżeniu jednorodny (stała wartość temperatury i odkształcenia w części pomiarowej próbki) oraz badań mających na celu poznanie mechanizmu zniszczenia.

Przeprowadzone ostatnio w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej wstępne badania [33] potwierdziły przydatność emisji akustycznej do analizy mechanizmu zniszczenia w procesie zmęczenia cieplnego.



Rys. 1. Zależność odkształcenia $\varepsilon_{T_{min}}$ (mierzonego w minimalnej temperaturze cyklu) nagromadzonego w procesie zmęczenia cieplnego od liczby cykli do złomu N_{kr}



Rys. 2. Zależność liczby cykli do złomu N_{kr} od średniej prędkości odkształcania $\dot{\varepsilon}_{Tmin}$ (mierzonego w minimalnej temperaturze cyklu) wraz z przedziałem obliczonym z prawdopodobieństwem 0,95

LITERATURA

[1] Żuchowski R.: VII Krajowa Konferencja Wytrzymałości i Badania Materiałów. Referat plenarny, Gdańsk 1977, sekcja I, s. 1.

[2] Grant N.L.: Symposium on Fatigue and Fracture of Metals, 1952.

[3] Grant N.L.: Issledovanija pri vysokich temperaturach, Innostr. Lit., Moskva 1962.

[4] Harper D.L., Fleiblach W.H., Fibch T.F.: Proc. ASTM, 1963, 63, s. 684.

[5] Semegan Ju.M., Koval Ju.I., [w]: Termoprocnost materiałov i konstruktivnych elementov. Naukowa Dumka, Kijev 1967.

[6] Troščenko W.T. i inni: Metody issledovanija soprotivlenija metallov deformirovaniju i razrušeniju pri cikličeskom nagruženii. Naukowa Dumka, Kijev 1974.

[7] Łozińskij M.G.: Povierchnostnoje primenenie indukcjonnogo nagreva, AN SSSR, 1958.

[8] Żmihorski E., Żółciak T.: Metaloznawstwo i obróbka cieplna, 1973, nr 3, s. 2.

[9] Żmihorski E., Kowalski W., Żółciak T.: Metaloznawstwo i obróbka cieplna, 1975, nr 14, s. 36.

[10] Żuchowski R. i inni: Raport Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, nr 136, Wrocław 1978.

[11] Kowamoto M., Tanaka T., Nakajima H.: J. Mater., 1966, 1, 4, s. 71.

[12] Taira S., Ohnami M.: Bull, JSME, 1962, 3. 17, s. 10.

[13] Byčkov N.G., Dulnev P.A.: Zav. Laborat., 1968, 34, 9, s. 1112.

[14] Żuchowski R. i inni: Raport Inst. Mater. i Mech. Techn. Polit.Wrocł., nr 107, Wrocław 1977.

[15] Żuchowski R. i inni: 7-th Congress on Material Testing,Budapest 1978, Vol. I, s. 399.

[16] Feltner C.E., Morrow J.D.: Trans. ASME, J. Basic Engng., 1961,83, D. 1, s. 15.

[17] Carden A.: Trudy Amerikanskogo Obščestva Inženerov Mechanikov, 1965, 1, s. 286.

[18] Morrow J.D., Tuler R.F.: Trans. ASME, J. Basic Engng. June 1965, s. 275.

[19] Gillemot L.F.: Proc. 1-st Inter. Conf. on Fracture, Sendai 1965, The Japanese Society for Strength and Fracture of Materials, Tokyo 1966, s. 1461.

[20] Martin D.E.: Trans. ASME, J. Basic Engng. December 1961, s. 565.

[21] Romanov A.N.: Problemy Procnosti, 1974, 1, s. 3.

[22] Romanov A.N.: Problemy Pročnosti, 1974, 1, s. 11.

[23] Pisarenko G.S., Možarovskij N.S., Antipov E.A.: Soprotivlenie žaropročnych materialov nestacjonarnym siłovym i temperaturnym vozdejstvijam, Naukowa Dumka, Kijev 1974.

[24] Kostjuk A.G., Truchnij A.D.: Teploenergetika, 1973, nr 12, s. 11.

[25] Kostjuk A.G., Chvatan A.M. [w]: Pročnost' pri malom čisle ciklov nagruženij, Nauka, Moskva 1969, s. 246.

[26] Manson S.S.: Experimental Mechanics, 1968, 8, 8, s. 349.

[27] Filatov V.M., Snejdrovič R.M.: Problemy Pročnosti, 1971, nr 2, s. 74.

[28] Langeborg R.: Attermo R.: Metal. Trans., 1971, 2, 7, s. 1821.

[29] Żuchowski R. i inni: 7-th Congress on Material Testing, Budapest 1978, Vol. I, s. 405.

[30] Żuchowski R.: Komunikat Inst. Mater. i Mech. Techn. Polit. Wrocł., nr 194, Wrocław 1978; VIII Seminarium Zespołu Zmęczenia Metali, Komitet Budowy Maszyn PAN - Politechnika Częstochowska, Częstochowa-Kokotek 1978, skróty referatów, s. 19.

[31] Żuchowski R. i inni: Raport Inst. Mater. i Mech. Techn. Polit.Wrocł., nr 156, Wrocław 1978.

[32] Buba N., Żuchowski R.: Referaty VIII Sympozujm doświadczalnych badań w mechanice ciała stałego, Warszawa 1978, cz. 1, s. 134.

[33] Pszonka A., Żuchowski R.: Komunikat Inst. Mater. i Mech. Techn.Polit. Wrocł. nr 209, Wrocław 1978.

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛОВОЙ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ

Р е з ю м е

В работе обсуждены методы исследования тепловой усталости металлов, особенно индукционный метод и метод сопротивления. Приведены критерия разрушения и дана оценка устойчивости материала к тепловой усталости.

ON THE RESEARCH ON METALLS THERMAL FATIGUE

S u m m a r y

The paper deals with the methods of examination of metalls thermal fatigue, and particularly the induction method and resistance method. The criterions of destruction were presented and the material thermal fatigue resistance was estimated.